

УДК 631.421631.417631.433.3

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГОРОДСКИХ ПОЧВ: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

© 2022 г. О. Ю. Гончарова<sup>а</sup>, \*, О. В. Семенюк<sup>а</sup>, Г. В. Матьшак<sup>а</sup>, Л. Г. Богатырев<sup>а</sup><sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: goncholgaj@gmail.com

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.

После доработки 15.02.2022 г.

Принята к публикации 24.02.2022 г.

Проведена оценка величины и пространственной вариабельности свойств и параметров биологической активности антропогенно-сформированных почв территории МГУ им. М.В. Ломоносова, а также факторов, ее определяющих. Свойства верхнего горизонта исследованных почв ожидаемо отличаются от свойств природных зональных почв в сторону увеличения величины рН (6.1–7.2), существенного увеличения содержания общего углерода (0.9–10.6%) и его запасов в верхнем слое 0–10 см (0.7–7.2 кг/м<sup>2</sup>). Большинство объектов характеризовались повышенными величинами микробного дыхания (до 8 мг С–СО<sub>2</sub>/(кг ч)) по сравнению с зональными почвами при сравнимых величинах эмиссии с поверхности (230–750 мг СО<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч)). Установлено высокое варьирование ряда почвенных свойств: влажности, эмиссии СО<sub>2</sub>, содержания общего углерода, микробного дыхания, целлюлозолитической активности, которое формируется под влиянием суммы антропогенных и природных факторов. Вариабельность увеличивается в ряду эмиссия–микробное дыхание–целлюлозолитическая активность. Высокая вариабельность почвенных свойств затрудняет определение критериев для выделения площадей опробования, которые значимо различаются. Наиболее тесные корреляционные связи с факторами среды выявлены для показателя микробного дыхания. По полученным данным главными предикторами этой величины являются содержание углерода и влажность, связь с влажностью больше ( $r = 0.87$ ,  $p = 0.0002$ ). Значительная обогаченность почв углеродом определяет потенциальную вероятность увеличения потока СО<sub>2</sub> при изменении параметров функционирования почв. Сложности в интерпретации результатов возникают из-за наличия неучтенных антропогенных факторов вариабельности, которые не входят в общепринятый набор для подобного рода исследований.

*Ключевые слова:* антропогенно-сформированные почвы, гидротермический режим, микробное дыхание, факторный анализ, эмиссия СО<sub>2</sub>, Hortic Phaeozem (Organotransportic, Technic), Urbic Technosol

DOI: 10.31857/S0032180X22080032

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время искусственные почвы составляют почти 3% территории суши, прогнозируется, что эта доля будет увеличиваться за счет прогрессирующей урбанизации; как ожидается, к 2050 г. 66% мирового населения будет проживать в городах [39, 52]. Если до недавнего времени в качестве доминирующего источника преобразования наземных ландшафтов рассматривалось сельское хозяйство, в настоящее время и в перспективе на первый план выходит именно урбанизация [41]. Увеличение темпов урбанизации ведет к необходимости включать городские ландшафты в глобальные модели круговоротов веществ, оценки потоков парниковых газов и др.

Неоспоримым фактом является то, что городские почвы существенно или полностью видоизменены по сравнению с природными в результате

антропогенной деятельности, но они по-прежнему выполняют свои экологические функции и оказывают экосистемные услуги наравне с почвами других ландшафтов [26, 29, 40, 46, 47]. Так, преобразование сельскохозяйственных и природных ландшафтов в урбанизированные может значительно изменить резервуары и потоки углерода в почве [47], при этом антропогенный фактор имеет как прямое, так и косвенное влияние (через изменение других факторов), и полностью изменяет естественный цикл С и его накопление в городских почвах [53]. В глобальном масштабе урбанизация вызывает, в частности, потери С из почвы и растительности. Согласно прогнозам, эти потери увеличатся в ближайшие десятилетия. Однако недавние данные свидетельствуют о том, что городские почвы могут выступать и как локальный сток С в урбоэкосистемах [24, 48].

В последние годы все больше внимания уделяется изучению роли городов в глобальном изменении климата, так как на них приходится большая часть антропогенных выбросов углекислого газа [35, 49]. В отличие от природных экосистем, потоки  $\text{CO}_2$  в городах представляют собой сложный баланс биогенных и антропогенных источников [19, 25]. До недавнего времени попытки количественно оценить роль городских территорий в глобальном углеродном бюджете в основном были сосредоточены на кадастрах выбросов, основанных на оценке сжигания ископаемого топлива [34, 37]. То есть данный подход полностью игнорировал биогенный вклад в содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере городов. Несмотря на то, что к настоящему времени доказано, что биогенные потоки  $\text{CO}_2$  в городах могут иметь важное значение, все еще мало данных о величине этого потока по сравнению с выбросами от сжигания ископаемого топлива, особенно в ландшафтном масштабе [30].

Еще на ранних этапах исследования городских почв отмечалось, что они демонстрируют удивительное разнообразие сред обитания, организмов и сообществ [31], молодые и старые почвы часто соседствуют на небольших площадях [50]. В обзорных работах последних лет отмечается, что городские почвы характеризуются очень высокой неоднородностью, как пространственной, так и временной, которая является функцией естественного разнообразия почв, нарушений почвы, а также многочисленных экологических градиентов [46]. В качестве основных движущих факторов неоднородности городских почв авторы выделяют: изначальную вариабельность почвенного фона, характер землепользования и его изменения в процессе развития городов, экологические градиенты и социально-экономические факторы [45]. Изменения в городских почвах происходят гораздо быстрее, чем в естественных, часто имеют точечный характер, что также увеличивает их неоднородность [27].

Безусловно, все, что связано с неоднородностью городских почв имеет отношение и к неоднородности параметров углеродного баланса и биологической активности. Отмечается высокая, подчас чрезвычайно высокая вариабельность содержания органического С и N в городских почвах по сравнению с естественными [47, 53]. С точки зрения оценки почвенного дыхания городские экосистемы также являются крайне вариабельным объектом [30]. При этом величины эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы и факторы, контролирующие ее пространственную и временную изменчивость в городских условиях, все еще плохо изучены [28, 44]. Дыхание почвы может дополнительно регулироваться пространственными и временными факторами в различных масштабах. Некоторые из этих факторов могут быть применимы только в определенном масштабе, а вновь появляющиеся фак-

торы могут замещать их при изменении пространственных и временных шкал [42]. Таким образом, учет пространственной и временной неоднородности потока  $\text{CO}_2$  из почвы — одна из самых больших проблем при масштабировании полученных данных и получении обобщающих оценок [51].

Цель работы — оценка величины и пространственной вариабельности параметров биологической активности антропогенно-сформированных почв городских территорий, а также факторов, ее определяющих.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили почвы, расположенные в г. Москве на территории МГУ им. М.В. Ломоносова (рис. 1): почвы дендрария ботанического сада, почвы Больших лизиметров почвенного стационара и почвы парковой территории кампуса. Почвы ботанического сада, выбранные в качестве объектов исследования, располагались на участке дендрария под насаждениями липы (*Tilia cordata* Mill.), березы (*Betula pendula* Roth), клена (*Acer platanoides* L.), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и граба обыкновенного (*Carpinus betulus* L.). На территории кампуса МГУ выбрали участки под древесными насаждениями тех же пород (липа, береза, клен). На лизиметрах почвенного стационара отобрали 4 объекта: ельник (*Picea abies* (L.) N. Karst.), дубово-кленовый лес (широколиственный лес в данной статье) (*Quercus robur* L., *Acer platanoides* L.), а также пар и залежь (многолетние травы). Таким образом, 10 объектов — это почвы под схожими древесными насаждениями, одна почва под многолетними травами, одна почва без растительности. Почвы всех объектов исследования являются антропогенно-сформированными приблизительно в одно время, но отличаются конструкцией и характером ухода (табл. 1).

1. Почвы насыпных почвенных лизиметров открытого типа, заложенных в 1967 г., являются полностью искусственными, сформированными на однотипной породе (бескарбонатном покровном суглинке из Подольского карьера с глубины 130–280 см) без использования насыпного органического горизонта. Лизиметры состоят из 20 отдельных бункеров (площадь каждого 8.3 м<sup>2</sup>, глубина 1.5 м, объем 12.4 м<sup>3</sup>). При создании на них были высажены разные растительные сообщества. Многолетний эксперимент не предполагал никакого дополнительного ухода, кроме удаления растительности на участке пара. Более чем за 50 лет сформировался маломощный почвенный профиль — пелозем гумусовый (Eutric Regosol (Loamic)) [6, 9, 36].

2. Ботанический сад. На спланированную поверхность (срезка верхних горизонтов естествен-



**Рис. 1.** Расположение объектов исследования: А – г. Москва; В – территория кампуса МГУ им. М.В. Ломоносова: 1 – большие лизиметры почвенного стационара; 2 – ботанический сад МГУ; 3 – парковая территория кампуса МГУ.

ных почв и засыпание оврагов) были насыпаны грунты различного состава, где верхний слой представлен органо-минеральным субстратом и в ряде случаев имеет значительную мощность. За 60 лет естественного функционирования под различными древесными породами (в основном интродуцированными) без дополнительного ухода сформировались почвы с относительно мощным гумусовым горизонтом – урбиквазимем (Hortic Phaeozem (Loamic, Organotransportic, Technic)) [14–16].

3. Почвы территории кампуса МГУ сформированы в середине 50-х годов XX в. аналогично почвам Ботанического сада. В отличие от других объектов, на данных участках производится сбор подстилки, удаление подлеска и другие мероприятия, включая периодическую смену и подсыпку поверхностных горизонтов. Почва – урбиквазимем или урбистратифицированная почва (Urbic Technosol (Loamic)) [14, 22].

Формирование почв ботанического сада и парковой территории проводилось в соответствии с об-

щепринятыми методиками, разработанными для городских почв, в то время как почвы лизиметров можно рассматривать как модели почвообразования в условиях эксперимента.

Суть проведенного исследования заключалась в одновременном (27 июня 2017 г.) в течение нескольких часов измерении лабильных почвенных показателей, таких как эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности почвы и температура верхнего горизонта. Погодные условия в день измерений: температура воздуха около 20°C, пасмурно, без осадков, штиль, давление 740 мм рт. ст. Измерение эмиссии проводили методом закрытых камер с помощью инфракрасного газоанализатора DX6220 (точность 0.002%) [5] в трехкратной повторности на площадках лизиметров и под насаждениями ели и граба в ботаническом саду и в десятикратной повторности на остальных площадках, всего проведено 78 измерений. Следует отметить, что на всех площадках лизиметров и на двух площадках в ботаническом саду (посадки ели и граба) измерения проводили на небольших по площади мониторинговых пло-

**Таблица 1.** Характеристика объектов исследования

Насаждения	Сомкнутость крон древостоя	Наличие подлеска	Проективное покрытие напочвенного покрова, %	Применение мероприятий по уходу	Мощность подстилки (конец июня), см
Ботанический сад					
Береза	0.5	Есть	60–90	Нет	1.5
Липа	0.8	Есть	50–85	Нет	1.6
Клен	0.8	Есть	10–15	Нет	2.0
Граб	0.5	Нет	30–35	Нет	2.0
Ель	0.8	Есть	65–70	Нет	1.0
Парковая территория кампуса МГУ					
Береза	0.5	Нет	40–80	Есть	0.6
Липа	0.8	Нет	10–15	Есть	2.8
Клен	0.6	Нет	30–40	Есть	1.3
Лизиметры почвенного стационара					
Пар	0	Нет	0	Есть	0.0
Ель	1.0	Нет	0	Нет	2.0
Широк. лес	0.6	Нет	0	Нет	1.5
Залежь	0	Нет	100	Нет	0.5

щадках, где ведутся многолетние круглогодичные исследования продукции  $\text{CO}_2$  почвами с контролем температуры и влажности [32, 33]. В этот же день отбирали образцы из верхнего слоя 0–10 см почвы (подстилку убирали).

Температуру почвы на глубине 10 см измеряли электронным термометром TP3001 (разрешение  $0.1^\circ\text{C}$ , точность  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Определение целлюлозолитической активности (ЦА) почв проводили аппликационным методом [12] путем заложение хлопкового материала на глубину 5 см в почву на 2 месяца (с июля по сентябрь) (трехкратная повторность на мониторинговых площадках и пятикратная на остальных). Данные выражали как потерю материала по отношению к начальному весу, выраженную в процентах.

Плотность верхних горизонтов почв определяли буровым методом [3] (двукратная повторность на мониторинговых площадках и трехкратная на остальных), массовую влажность термогравиметрически (трехкратная повторность). Реакцию среды определяли в водной суспензии почв в отношении почва : вода = 1 : 2.5 (двукратная повторность на мониторинговых площадках и десятикратная на остальных). Содержание  $\text{C}_{\text{общ}}$  определяли на экспресс-анализаторе Vario-EIII (Elementar) (двукратная повторность на мониторинговых площадках и восьмикратная на остальных). Расчет запасов  $\text{C}_{\text{общ}}$  проводили на слой 10 см.

Базальное (микробное) дыхание (БД) определяли в свежих образцах по скорости выделения  $\text{CO}_2$

почвой за 12–15 ч инкубации при естественной влажности, но в стандартных температурных условиях ( $22^\circ\text{C}$ ) (трехкратная повторность на мониторинговых площадках и десятикратная на остальных), измерение концентрации  $\text{CO}_2$  в пробах проводили на газовом анализаторе RMT DX6210 [20]. Скорость БД выражали в  $\text{mg C-CO}_2/(\text{kg ч})$ . Предварительно из образцов почвы отбирали живые корни, и почвенную массу пропускали через сито с диаметром ячеек 3 мм.

Для анализа полученных данных использовали описательную статистику, однофакторный дисперсионный анализ, корреляционный анализ с использованием коэффициента корреляции Спирмена, регрессионный анализ, факторный анализ (метод главных компонент). Выбранный уровень значимости  $\alpha = 0.05$ . Для математической обработки результатов применяли программу Statistica 10. Оценку общих статистических показателей для параметров биологической активности (эмиссии  $\text{CO}_2$ , БД, ЦА) проводили для всех повторностей (78, 78, 45 соответственно). Для других видов анализа использовали средние значения параметров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Свойства верхнего горизонта почв.** Верхние горизонты почв всех объектов характеризуются высокой вариабельностью как содержания, так и запасов  $\text{C}_{\text{общ}}$  (коэффициент вариации (КВ) 50 и 46% соответственно). Наименьшие величины данных показателей получены для почв лизиметров, что



находится в соответствии с особенностями их формирования. Для территории кампуса МГУ и для ботанического сада показатели сопоставимы: содержание углерода колеблется от 5.1 до 10.8% и в целом может оцениваться как высокое. Почвы в среднем имеют нейтральную реакцию среды, pH от 6.6 до 7.2. Этот показатель крайне мало варьирует между объектами, КВ = 4.7% — минимальный среди всех свойств и параметров функционирования. Наряду с этим, можно выделить несколько пониженный pH (6.1–6.4) для почв лизиметров. Верхние горизонты почв существенно различаются по плотности (КВ = 35%), которая изменяется от 0.28 до 1.16. Низкая плотность характерна для почв лизиметров под еловыми и широколиственными насаждениями, где круговорот несколько замедлен и формируется своеобразный грубогумусовый горизонт с высоким содержанием органического вещества и небольшой плотностью.

**Параметры функционирования почв.** В качестве параметров функционирования были оценены температура верхнего слоя 0–10 см почв и массовая влажность (табл. 2). Температура почвы варьировала незначительно: от 13 до 16°C (КВ ≈ 6%). Максимальные температуры отмечены для площадок без древесной растительности, минимальные под посадками ели как в ботаническом саду, так и на лизиметрах. В отличие от температуры, влажность оказалась очень варибельным параметром (КВ 39%). Максимальная влажность отмечена для почвы широколиственного леса на лизиметрах и кленовника ботанического сада, минимальная — на парующем участке лизиметров.

**Параметры биологической активности почв.** В качестве показателей биологической активности почв рассматривали: эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы, БД и ЦА. Эмиссия CO<sub>2</sub> в контексте данной работы рассматривается как актуальный единовременный комплексный показатель биологической активности определенного участка в естественных условиях. Оценку величины БД верхних горизонтов почв проводили в стандартных лабораторных условиях. ЦА характеризовала интегральную биологическую (целлюлозолитическую) активность изученных объектов за двухмесячный период (период инкубации субстрата).

*Общие статистические параметры.* Эмиссия CO<sub>2</sub> варьировала в очень широких пределах: от 150 до 850 мг CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч), при этом КВ составил 39%, что с точки зрения статистики является значительной величиной [11], но по сравнению с аналогичными исследованиями имеет тот же диапазон или существенно меньше [2, 8, 42]. Область наиболее вероятных значений, которая отделяется границами верхнего и нижнего квартилей, находится в диапазоне от 300 до 500 мг CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> ч). Распределение величины аппроксимируется как нормальное.

Для однофакторного дисперсионного анализа в качестве группирующих факторов выбрали принадлежность к определенному функциональному участку (лизиметры, ботанический сад, территория кампуса), а также площадкам опробования, различающимся по типу землепользования и видовому составу насаждений. Согласно анализу, эмиссия варьирует незначимо между территориями, но значимо между площадками исследования (рис. 2а, 2б). В силу специфики анализа и исходя из визуализированных данных, очевидно, что значимые различия в величине эмиссии существуют не между всеми площадками. При небольших допущениях выделяются три группы. Пар и залежь на лизиметрах — наиболее низкие значения эмиссии, средние значения обнаружены для насаждений березы, клена и липы в ботаническом саду и на территории МГУ. Третья группа с максимальными значениями — насаждения ели, граба и широколиственного леса (ботанический сад и лизиметры).

БД варьировало от 0.16 до 8.6 мг C—CO<sub>2</sub>/(кг ч), область наиболее вероятных значений находилась в диапазоне 1.84–3.38 мг C—CO<sub>2</sub>/(кг ч). При этом КВ больше, чем для эмиссии — 55%, и характеризуется как очень высокий. КВ > 50% может свидетельствовать о нарушении симметричности выборки [11], что подтверждается анализом на нормальность распределения. Медиана смещена в сторону низких значений. Нормальность выборки достигается при исключении одного из объектов — широколиственного леса на лизиметрах, величины БД для которого экстремально высокие. При таком условии КВ снижается до 40%. С учетом неоднородности объектов исследования нормировали данный показатель по плотности и ввели в общий анализ величину БД<sub>v</sub>, численно равную величине БД, умноженной на плотность горизонта [21]. Данная манипуляция позволяет более корректно сравнивать дыхание разных объектов. Величина БД<sub>v</sub> характеризуется нормальным распределением, диапазон наиболее вероятных значений 1.76–2.44 г C—CO<sub>2</sub>/(м<sup>3</sup> ч).

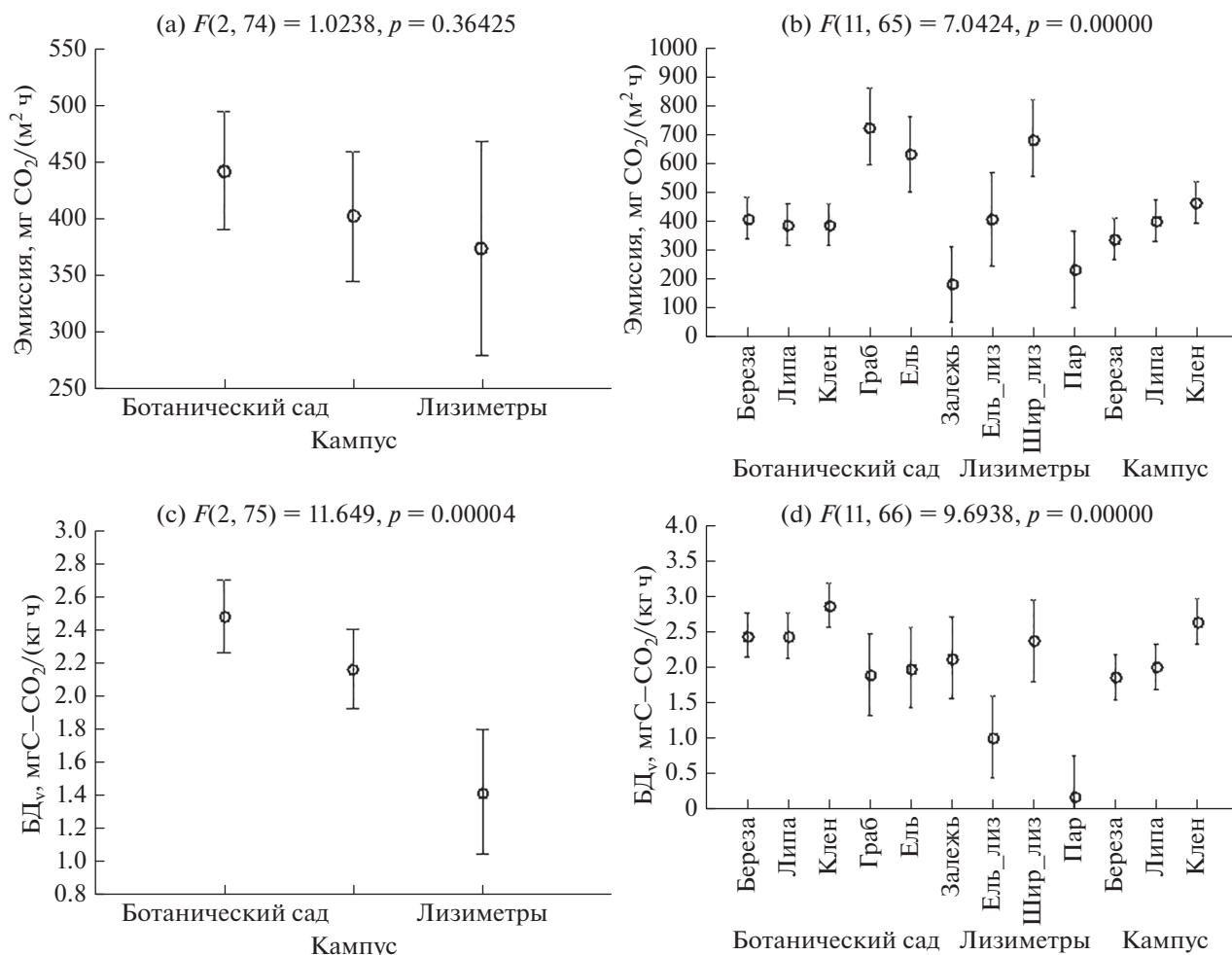
Согласно однофакторному дисперсионному анализу, который проведен для показателя БД<sub>v</sub> в силу нормальности распределения, различия по данному показателю между территориями значимы (ботанический сад, лизиметры, кампус), наблюдается его уменьшение от объектов ботанического сада к лизиметрам (рис. 2с). Значимыми оказываются также различия по площадкам (рис. 2д), но только за счет варианта пар, где значения существенно ниже, чем на всех остальных площадках. Можно отметить повышенные значения БД<sub>v</sub> для почв кленовников (в ботаническом саду и на территории кампуса) и широколиственного леса на лизиметрах, где также доминирует клен.

Показатель ЦА характеризовался максимальным среди трех параметров КВ = 61%, но, не-

**Таблица 2.** Основные показатели биологической активности, физические и химические свойства почв (слой 0–10 см, указаны среднее ± стандартное отклонение)

Насаж- дения	Эмиссия, мг CO <sub>2</sub> /(м <sup>2</sup> ч)	БД, мг C–CO <sub>2</sub> /(кг ч)	БД <sub>н</sub> , г C–CO <sub>2</sub> /(м <sup>3</sup> ч)	Влажность массовая, %	ЦА, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура, °C	pH	C <sub>общ</sub> , %	Запас C (10 см), кг/м <sup>2</sup>
<b>Ботанический сад</b>										
Береза	409 ± 100	3.59 ± 0.89	2.44 ± 0.61	49.4 ± 6.4	32 ± 19	0.68 ± 0.07	13.8 ± 0.1	6.6 ± 0.2	10.6 ± 1.0	7.2 ± 0.7
Липа	386 ± 129	2.54 ± 0.56	2.44 ± 0.54	49.0 ± 4.5	51 ± 27	0.96 ± 0.06	13.7 ± 0.2	6.6 ± 0.2	7.4 ± 1.1	7.1 ± 1.0
Клен	388 ± 117	3.33 ± 0.95	2.86 ± 0.82	68.4 ± 24.1	71 ± 35	0.86 ± 0.14	13.9 ± 0.3	7.2 ± 0.4	5.1 ± 0.8	4.4 ± 0.7
Граб	729 ± 39	2.75 ± 0.03	2.26 ± 0.09	37.4*	34 ± 11	0.82	14.3	7.2	5.4	4.4
Ель	631 ± 69	2.3 ± 0.10	1.66 ± 0.03	37.3	46 ± 8	0.72	13.0	6.9	8.8	6.3
<b>Парковая территория кампуса МГУ</b>										
Береза	337 ± 119	1.74 ± 0.24	1.85 ± 0.26	36.1 ± 4.4	42 ± 32	1.06 ± 0.09	13.6 ± 0.9	6.5 ± 0.3	7.2 ± 1.6	7.7 ± 1.7
Липа	402 ± 132	1.72 ± 0.37	1.99 ± 0.43	31.5 ± 2.7	30 ± 28	1.16 ± 0.03	15.2 ± 0.8	6.7 ± 0.2	3.9 ± 0.9	4.5 ± 1.0
Клен	464 ± 135	2.53 ± 0.43	2.62 ± 0.45	48.1 ± 5.2	44 ± 30	1.04 ± 0.06	14.8 ± 0.7	6.8 ± 0.4	5.5 ± 3.0	5.7 ± 3.1
<b>Лизиметры почвенного стационара</b>										
Пар	232 ± 49	0.19 ± 0.03	0.17 ± 0.03	20.3	21 ± 3	0.87	16.0	6.5	0.9	0.7
Ель	407 ± 73	3.37 ± 0.68	1.01 ± 0.20	35.5	28 ± 11	0.30	13.5	6.1	10.8	3.2
Широко- листв. лес	747 ± 92	8.43 ± 0.17	2.36 ± 0.05	83.8	23 ± 8	0.28	14.0	6.7	10.5	2.9
Залежь	181 ± 104	2.32 ± 0.35	2.13 ± 0.23	37.0	65 ± 20	0.92	15.3	6.4	2.3	2.2

\* Стандартные отклонения для некоторых показателей объектов биологического сада и лизиметров не рассчитывали в связи с небольшим количеством повторностей.



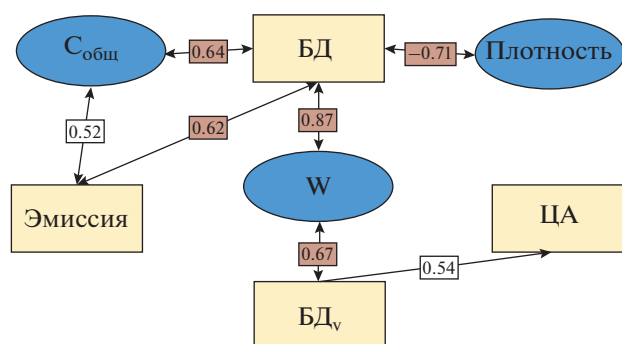
**Рис. 2.** Средние и доверительные интервалы (уровень значимости 0.95) эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы: а – группирующий фактор – функциональная территория, б – группирующий фактор – площадка опробования, выделенная с учетом видового состава древостоя; и BD<sub>v</sub>: с – группирующий фактор – функциональная территория, d – группирующий фактор – площадка опробования, выделенная с учетом видового состава древостоя.

смотря на это, нормальным распределением. Величина потери исходного материала варьировала от 3.5 до почти 100%, наиболее вероятные значения лежали в диапазоне от 20 до 55%. Однофакторный дисперсионный анализ не дает значимых отличий ни при каких вариантах группировки объектов. Максимальные значения данного показателя отмечены на залежи (лизиметры) и в кленовнике в ботаническом саду, минимальные на остальных трех участках лизиметров.

**Факторы, влияющие на биологическую активность.** Для оценки влияния различных факторов (температуры, влажности, содержания C<sub>общ</sub>, запасов C<sub>общ</sub>, плотности, рН) на биологическую активность почв были взяты средние значения величин для каждой из рассмотренных площадок опробования (табл. 2). Разведочный корреляционный анализ выявил значимую линейную связь между эмиссией и BD, BD и двумя показателями: влаж-

ностью и плотностью (рис. 3). То есть величины BD, BD<sub>v</sub>, эмиссии связаны между собой непосредственно или через какие-либо факторы, величина ЦА стоит обособленно и не пересекается с лабильными параметрами.

Для оценки степени влияния факторов на биологическую активность почв проведен пошаговый регрессионный анализ. При таком подходе для величины эмиссии в модель включены четыре переменные (факторы), влияние которых значимо: BD, рН, влажность и C<sub>общ</sub>. Суммарно они объясняют 90% изменчивости величины эмиссии. BD, рН и содержание C<sub>общ</sub> оказывают в данной модели прямое влияние на величину эмиссии, влажность – обратное (табл. 3). Для величины BD в модель включаются два фактора: влажность и плотность почвы. Суммарно эти два фактора объясняют 90% изменчивости BD, влажность оказывает прямое влияние, плотность – обратное. Для ве-



**Рис. 3.** Корреляционные связи (коэффициент корреляции Пирсона) между параметрами биологической активности почв (эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы, БД, БД<sub>v</sub>, ЦА) и свойствами почвы ( $W$  – массовая влажность). В серых прямоугольниках на стрелках представлены значимые коэффициенты корреляции, в белых – высокие, но не значимые.

личины ЦА в пошаговую регрессионную модель включаются два фактора: МД<sub>v</sub> и МД. Суммарно они объясняют лишь 40% изменчивости.

Метод главных компонент позволяет выявить в многомерном пространстве значений факторы, оказывающие максимальное влияние на дисперсию показателей, и сократить их количество, объединив несколько однонаправленных факторов в один – главную компоненту. Метод также может служить основой для группировки (классификации) объектов по характеру действия на них различных факторов.

В результате факторного анализа выделено три главных компоненты, суммарно объясняющие более 90% дисперсии исходных рядов, вклад первой из них составляет 45%. Наибольшую нагрузку на первую компоненту имеют (по убыванию)  $C_{\text{общ}}$ , температура почвы, БД, влажность и эмиссия. Следует отметить, что показатели биологической ак-

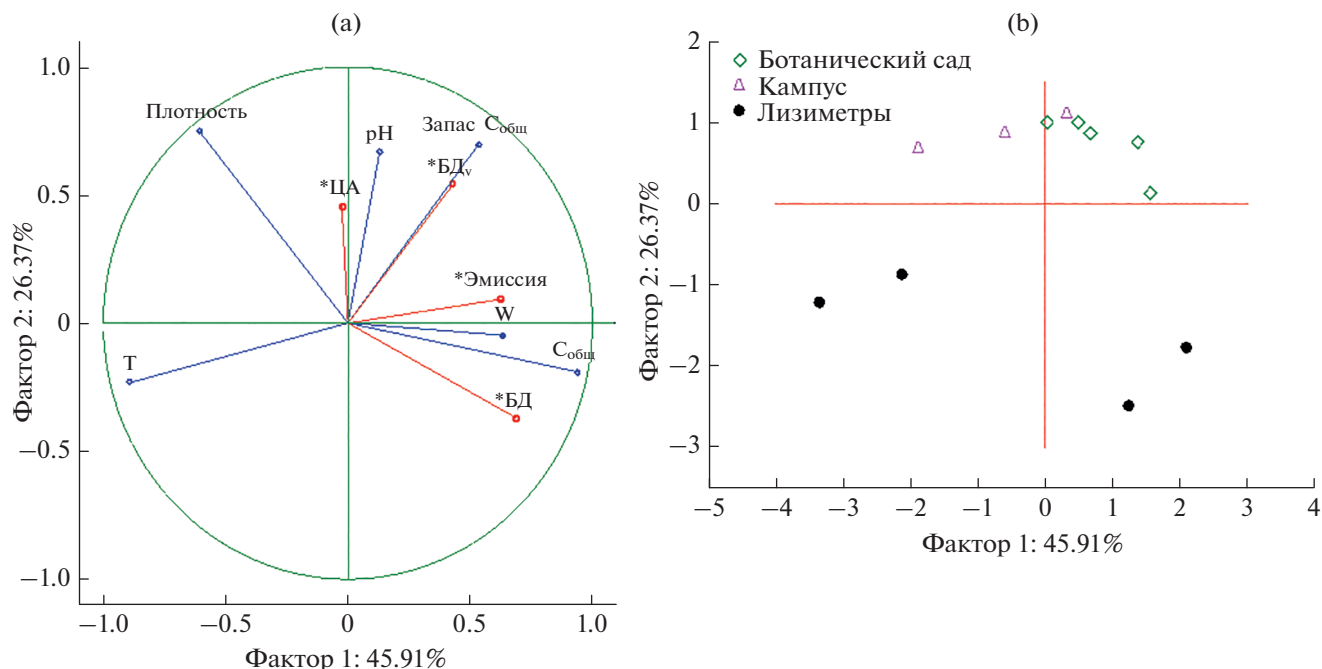
тивности и содержание  $C_{\text{общ}}$  входят в первую компоненту с положительным знаком, а температура с отрицательным, то есть эти группы параметров связаны друг с другом обратной зависимостью. Параметрами, имеющими наибольшую нагрузку на вторую компоненту, являются плотность, запас  $C_{\text{общ}}$ , рН, БД<sub>v</sub>. Все параметры имеют один знак. Третья компонента связана с влажностью и БД, которые тесно коррелируют между собой, а также рН. Исходя из анализа факторной матрицы, процентной доли параметров и корреляций (знаков) между ними, первую компоненту можно связать с лабильными показателями биологической активности почв (эмиссия и БД) и факторами, определяющими ее пространственную вариабельность ( $C_{\text{общ}}$ , влажность). Физические параметры, в том числе температура, имеют обратный вес при разделении объектов. Вторая компонента связана с интегральной биологической активностью за сезон (ЦА), а также всеми параметрами, которые связаны со сложением почвы (объемные характеристики): БД<sub>v</sub>, плотность, запасы  $C_{\text{общ}}$ , а также с рН.

На рис. 4а представлено расположение объектов исследования в проекции главных компонент. Наиболее неоднородной и отличающейся от других объектов группой являются почвы лизиметров. По первой компоненте существенно различаются объекты под древесными посадками и пар с залежью. Последние характеризуются низкой биологической активностью, низким содержанием  $C_{\text{общ}}$ , но повышенной температурой верхних горизонтов и плотностью. При этом все объекты лизиметров находятся в отрицательной области второй компоненты, то есть характеризуются пониженным рН и низкой ЦА. Объекты ботанического сада тяготеют к положительной части как первой компоненты, так и второй, то есть характеризуются повышенным содержанием и

**Таблица 3.** Результаты множественного регрессионного анализа

Фактор	Стандартизованный коэффициент Вета	Коэффициент регрессии	<i>t</i> -критерий	<i>p</i> -уровень значимости
Модель для величины эмиссии $\text{CO}_2$ с поверхности почвы ( $R = 0.96$ , $R$ скорректированный = 0.88)				
БД	1.30	117.09	4.85	0.0005
рН	0.86	484.18	6.74	0.0019
Влажность массовая	-1.13	-11.73	-4.39	0.0003
$C_{\text{орг}}$	0.37	19.81	2.58	0.0365
Модель для величины БД ( $R = 0.95$ , $R$ скорректированный = 0.88)				
Влажность массовая	0.70	0.08	5.95	0.0002
Плотность	-0.41	-2.91	-3.50	0.0067
Модель для величины ЦА ( $R = 0.70$ , $R$ скорректированный = 0.38)				
БД <sub>v</sub>	0.76	15.86	2.86	0.0187
БД	-0.49	-3.92	-1.85	0.0966





**Рис. 4.** Анализ главных компонент микробиологических, химических и физических показателей почвы (0–10 см) ботанического сада, кампуса МГУ и лизиметров почвенного стационара; а – проекция показателей на поле первых двух компонент (*T* – температура почвы, *W* – массовая влажность почвы); б – расположение объектов исследования в плоскости двух первых компонент.

запасами  $C_{общ}$  и высокой микробной активностью, включая эмиссию, БД и ЦА. Объекты, расположенные на территории кампуса, тяготеют к отрицательной части первой компоненты, характеризуются повышенной плотностью и пониженными величинами БД и эмиссии, но при этом характеризуются сравнительно высокой ЦА.

Сравнение с простой корреляционной матрицей и оценка остаточных корреляций свидетельствуют об адекватности построенной модели, некоторые остаточные корреляции хоть и являются значимыми, не превышают 0.3.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства верхнего горизонта исследованных городских почв ожидаемо отличаются от свойств природных зональных почв в сторону увеличения величины рН, существенного увеличения содержания  $C_{общ}$  и его запасов в верхнем горизонте [1, 13, 17]. Данные тенденции неоднократно отмечались в работах, связанных с почвами Москвы [15, 16, 22, 43]. Очевидно, что увеличение содержания  $C_{общ}$  связано с добавлением органического субстрата на начальных этапах формирования сконструированных почв. Следует отметить несколько пониженный рН в почвах лизиметров, что определяется особенностями субстрата, который использовался для их создания – бескарбонатного суглинка с рН 5.4 [23]. Это их отличает

от остальных объектов, где помимо пылевого загрязнения, свойственного всем городским объектам, нейтральная реакция среды может наследоваться от почвогрунтов, на которых они сформированы. Таким образом, варьирование свойств городских почв отражает разнообразие свойств почвогрунтов, используемых при их формировании, результирующее влияние природных факторов почвообразования в процессе их развития, изменения вещественного состава в условиях применения системы ухода за зелеными насаждениями, а также антропогенное влияние.

Оценить биологические свойства изученных объектов можно по двум позициям. Если рассматривать величины БД, попадающие в области наиболее вероятных значений, то они соответствуют градациям “нормальная” и “высокая”, предложенной для оценки потенциальной биологической активности городских почв [21]. Но если сравнивать со значениями величины БД для почв Подмоскovie [4, 18], то они больше. Величины эмиссии  $CO_2$  с поверхности почвы сопоставимы или несколько меньше таковых для почв Подмоскovie и ЦЛГЗ в соответствующем диапазоне температур и влажности [10, 38]. Органическое вещество, которое используется при формировании городских почв (торфосмеси или сапропели), не находится в термодинамическом равновесии с условиями, в которые оно попадает. При высоком содержании углерода в почвах, повышенной

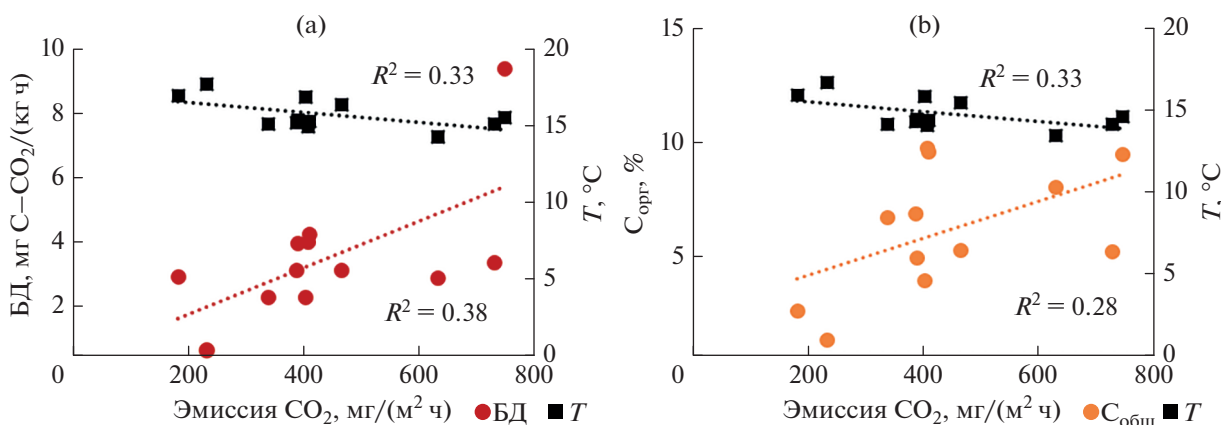


Рис. 5. Взаимосвязь эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы с БД (а) и температурой почвы; содержанием  $\text{C}_{\text{общ}}$  и температурой почвы (б). Пунктирными линиями обозначены линейные тренды.

эмиссии  $\text{CO}_2$  не отмечается. Однако повышенные величины БД, полученные в данном исследовании и другими авторами [21], могут свидетельствовать о возможной повышенной генерации  $\text{CO}_2$  городскими почвами по сравнению с естественными при изменении в сторону оптимизации условий (в том числе влажности) функционирования микроорганизмов-деструкторов.

При оценке вариабельности свойств почв исследуемых объектов не выявлено существенных различий по температуре верхних горизонтов в выбранный период времени, что определяет ее незначительный вклад в пространственную вариабельность биологических свойств. Однако установлено высокое варьирование таких почвенных свойств, как влажность, эмиссия  $\text{CO}_2$ , содержание  $\text{C}_{\text{общ}}$ , БД, ЦА, которое формируется под влиянием суммы антропогенных и природных факторов. Широкому диапазону изменчивости почвенных свойств соответствует большое разнообразие экологических ниш, что, по-видимому, может определять устойчивость городских экосистем.

Наиболее тесные корреляционные связи с факторами среды были выявлены для показателя БД. Главными предикторами этой величины, по нашим данным, являются содержание  $\text{C}_{\text{общ}}$  и влажность, причем связь с влажностью больше ( $r = 0.87$ ,  $p = 0.0002$ ). На наш взгляд, это очень важный результат, который указывает на роль локальных гидротермических условий, формирование которых обусловлено всей совокупностью факторов неоднородности в городских условиях. В нашем случае — это наличие и характер древесной растительности, наличие подстилки, характер грунта, причем все эти факторы без исключения — антропогенно-обусловленные.

Хочется обратить внимание на тот факт, что вариабельность рассматриваемых свойств растет в ряду эмиссия—БД—ЦА, что на первый взгляд

кажется не совсем закономерным, так как часть параметров при измерении величины БД стандартизирована. Проведенная статистическая обработка дает объяснение данному факту. Рассмотрим это на примере температуры почвы и эмиссии  $\text{CO}_2$ . Разделение объектов по этим двум параметрам идет в строго противоположных направлениях. Повышенной температурой верхних горизонтов характеризуются почвы либо с отсутствием выраженной подстилки, либо с разреженным растительным покровом. Они закономерно характеризуются пониженным содержанием  $\text{C}_{\text{общ}}$  и величинами биологической активности. При этом несколько более благоприятные по сравнению с другими объектами термические условия увеличивают их измеряемую в поле эмиссию, и происходит уменьшение вариабельности данного показателя по сравнению с потенциальным дыханием (БД). Таким образом, такой очевидный предиктор биологической активности, как температура, не является фактором пространственной вариабельности эмиссии, влияние других факторов превалирует (рис. 5). Данный факт отмечается в работах по оценке вариабельности эмиссии [7]. Таким образом, взаимовлияние разнонаправленных факторов в настоящем исследовании приводит к уменьшению вариабельности интегральных показателей.

Высокую вариабельность ЦА можно объяснить накопленным эффектом, когда различия между объектами усиливаются при добавлении временной составляющей. Можно предположить, что выявленные несущественные различия в температурах верхних горизонтов исследованных почв, которые не оказывают существенного влияния на измеряемые одномоментные показатели (эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности), могут оказать влияние на биологическую активность почв в другом временном

диапазоне, например, за весь вегетационный период (ЦА определялась за двухмесячный период).

При планировании исследования площадки опробования изначально выбирали с учетом однотипной растительности и принадлежности к определенным функциональным участкам, то есть задали некую кластеризацию территории. Мы отдавали себе отчет, что такая группировка является искусственной, учитывая антропогенный характер распределения растительности. Дисперсионный анализ подтвердил данное предположение, и по биологическим показателям значимо эти участки не различаются, то есть варибельность внутри участков выше, чем между ними. Исключение, как и ожидалось, составляют специфические объекты – пар и залежь на лизиметрах, которые изначально были взяты как отличающиеся объекты. Данные дисперсионного анализа подтверждаются и факторным анализом, который четко обособляет в отдельные области лишь объекты на лизиметрах. Похожие заключения были сделаны для г. Нанкин (Китай) [54] при исследовании пространственной варибельности содержания фосфора в городских объектах. Авторами показано, что функциональное зонирование в разных масштабах не является фактором, определяющим варибельность данного показателя в городских почвах, наилучшим дифференцирующим фактором оказался тип насаждений. Можно сделать заключение, что какая-то определенная почвенная характеристика в двух, даже близко расположенных разностях, может сильно различаться в силу неприродных, часто непредсказуемых причин. Возможно, все почвенные пробы, которые анализируются в городе, нужно рассматривать как независимые объекты. То есть проблема выбора участка опробования для городских почв стоит очень остро.

На основании проведенных исследований можно предложить некоторые методические рекомендации по исследованию и мониторингу городских почв. Высокая варибельность почвенных свойств затрудняет определение критериев для выделения площадей опробования, которые значимо различаются. Однако установлены различия между почвами под древесными насаждениями и под травяными системами, что требует дифференцированного подхода при оценке величины эмиссии  $\text{CO}_2$  и проведения методических работ по установлению уровня этого показателя для данных типов биогеоценозов. Значительная часть территории города занята насаждениями с парковым режимом ухода, где почвы характеризуются относительно пониженной величиной БД, что также требует установления соответствующих диапазонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что сконструированные почвы городских экосистем отличаются от зональных почв по

реакции среды и содержанию углерода, а также характеризуются повышенным варьированием этих свойств. Существенных различий между сконструированными и естественными почвами по большинству выбранных показателей биологической активности и их изменчивостью не выявлено.

Проведенное исследование показало, что пространственную варибельность свойств городской почвы трудно интерпретировать в соответствии с существующей почвенно-ландшафтной парадигмой. Особенно данное утверждение касается биологических свойств, которые очень чувствительны к изменениям параметров среды.

Установлено, что обогащение городских почв углеродом не оказывает существенного влияния на увеличение эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу в существующих условиях функционирования почв. Однако есть потенциальная возможность увеличения потока  $\text{CO}_2$  при изменении параметров функционирования почв, например увлажнения, что необходимо учитывать при оценке и прогнозировании “углеродного следа” городских экосистем.

Сложности в интерпретации результатов также возникают из-за наличия неучтенных антропогенных факторов варибельности, которые не входят в общепринятый, стандартный набор для подобного рода исследований. В контексте исследования экологии городских почв антропогенный фактор почти всегда остается недоучтенным в силу своей специфики, а именно, непредсказуемости и точечного воздействия. По различию между параметрами варьирования свойств естественных и городских почв, по-видимому, можно косвенно судить о вкладе антропогенного фактора в пространственную изменчивость почвенных свойств городских территорий.

Понимание взаимосвязи между варибельностью биологических свойств в пределах определенного участка и пространственной варибельностью факторов может помочь определить будущие схемы отбора проб в городских условиях и прояснить неопределенность в масштабировании полученных данных.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР “Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах” и в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Почикалова А.В., Кудеяров В.Н.* Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 345–353. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17030029>
2. *Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И., Тимофеева М.В.* Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1328–1340. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110052>
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмоскovie // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1231–1245.
5. *Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Матышак Г.В., Бобрик А.А.* Сезонная динамика продукции CO<sub>2</sub> почвами дендрария ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2016. № 2. С. 3–10.
6. *Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А., Богатырев Л.Г., Демидова А.Н., Прилепский Н.Г., Жилин Н.И., Бенедиктова А.И.* Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2017. № 1. С. 9–15.
7. *Карелин Д.В., Азовский А.И., Куманяев А.С., Замолодчиков Д.Г.* Значение пространственного и временного масштаба при анализе факторов эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы в лесах валдайской возвышенности // Лесоведение. 2019. № 1. С. 29–37. <https://doi.org/10.1134/S0024114819010078>
8. *Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолодчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO<sub>2</sub> из почв южно-таежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. *Копцик Г.Н., Курприянова Ю.В., Кадулин М.С.* Пространственная изменчивость эмиссии диоксида углерода почвами в основных типах лесных экосистем Звенигородской биостанции МГУ им. М.В. Ломоносова // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2018. № 2. С. 40–47.
11. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1990.
12. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 302 с.
13. Почвы Московской области и их использование. В 2-х томах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2002. Т. 1. 500 с.
14. *Прокофьева Т.В., Герасимова М.И.* Городские почвы: диагностика и классификационное определение по материалам научной экскурсии конференции SUITMA-9 по Москве // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1057–1070. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18090095>
15. *Раннопорт А.В.* Антропогенные почвы городских ботанических садов (на примере Москвы и Санкт-Петербурга). Дис. ... канд. биол. наук. М., 2004. 152 с.
16. *Розанова М.С., Прокофьева Т.В., Лысак Л.В., Рахлева А.А.* Органическое вещество почв Ботанического сада МГУ имени М.В. Ломоносова на Ленинских горах // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1079–1092. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090124>
17. *Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Пространственная вариабельность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1429–1437.
18. *Семенюк О.В., Ильяшенко М.А., Бобрик А.А.* Оценка экологических функций парковых почв на основе показателей их биологической активности // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 3. С. 35–39.
19. *Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И.* Использование особенностей структурно-функциональной организации подстилок для оценки интенсивности круговорота в городских насаждениях (на примере Москвы) // Почвоведение. 2021. № 5. С. 1–14. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050178>
20. *Смагин А.В., Долгих А.В., Карелин Д.В.* Экспериментальные исследования и физически обоснованная модель эмиссии диоксида углерода из вскрытого культурного слоя в Великом Новгороде // Почвоведение. 2016. № 4. С. 489–495. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16040122>
21. *Смагин А.В., Смагина М.В., Садовникова Н.Б.* Биологическое потребление кислорода в почвах и подстилках // Почвоведение. 2018. № 3. С. 304–317. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1803005X>
22. *Стома Г.В., Ахадова Е.В.* Характеристика и экологическое состояние почв территории МГУ имени М.В. Ломоносова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2015. № 1. С. 35–41.
23. *Чижикова Н.П., Верховец И.А., Первова Н.Е., Лебедева М.П., Скворцова Е.Б., Золотарев Г.В., Савельев Д.В.* Начальные стадии почвообразования на покровном суглинке (модельный эксперимент). Ижевск, 2016. 252 с.
24. *Vae J., Ryu Y.* Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park // Landscape and Urban Planning. 2015. V. 136. P. 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.015>
25. *Bellucco V., Marras S., Grimmond C.S.B., Jarvi L., Sirca C., Spano D.* Modelling the biogenic CO<sub>2</sub> exchange in urban and non-urban ecosystem through the assessment of light-response curve parameters. Agric. For. Meteorol. 2017. V. 236. P. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.011>
26. *Bullock P., Gregory P.J.* Soils: a neglected resource in urban areas // Soils in the Urban Environment. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. P. 1–5.
27. *Caruso T., Migliorini M., Rota E., Bargagli R.* Highly diverse soil urban communities: does stochasticity play a major role? // Appl. Soil Ecol. 2017. V. 110. P. 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.10.012>



28. *Chen H., Zhang W., Gilliam F., Liu L., Huang J., Zhang T., Wang W., Mo J.* Changes in soil carbon sequestration in *Pinus massoniana* forests along an urban-to-rural gradient of Southern China // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 6609–6616. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6609-2013>
29. *De Kimpe C.R., Morel J.L.* Urban soil management: a growing concern // *Soil Sci*. 2000. V. 165 (1). P. 31–40. <https://doi.org/10.1097/00010694-200001000-00005>
30. *Decina M., Hutyra L.R., Gately C.K., Getson J.M., Reinmann A.B., Short Gianotti A.G., Temple P.H.* Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area // *Environ. Pollut.* 2016. V. 212. P. 433–439. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.012>
31. *Gill D., Bonnett P.A.* Nature in the urban landscape: A study of city ecosystems. York, Baltimore, 1973.
32. *Goncharova O., Matyshak G., Udovenko M., Semenyuk O., Epstein H., Bobrik A.* Temporal dynamics, drivers, and components of soil respiration in urban forest ecosystems // *Catena*. 2020. V. 185. P. 104299. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104299>
33. *Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Udovenko M.M., Bobrik A.A., Semenyuk O.V.* Seasonal and annual variations in soil respiration of the artificial landscapes (Moscow Botanical Garden) // *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services*. Springer International Publishing, Cham. 2019. P. 112–122. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1_15)
34. *Hutyra L.R., Duren R., Gurney K., Grimm N.B., Kort E., Larson E., Shrestha, G.* Urbanization and the carbon cycle: Current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective // *Earth's Future*. 2014. V. 2(10). P. 473–495. <https://doi.org/10.1002/2014EF000255>
35. International Energy Agency, 2008. World Energy Outlook 2008. <https://doi.org/10.1787/weo-2008-en>
36. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome.
37. *Kennedy C., Steinberge, J., Gasson B., Hansen Y., Hillman T., Havranek M., Pataki D., Phdungsilp A., Ramaswami A., Mendez G.V.* Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities // *Energy Policy*. 2010. V. 38(9). P. 4828–4837. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.050>
38. *Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., Lopes De Gerenyu V.* Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2010. V. 62(5). P. 497–505. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x>
39. *Liu Z., He C., Zhou Y., Wu J.* How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion // *Landsc. Ecol.* 2014. V. 29. P. 763–771. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0034-y>
40. *Lorenz K., Lal R.* Biogeochemical C and N cycles in urban soils // *Environ. Int.* 2009. V. 35. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.006>
41. *Lorenz K., Lal R.* Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems // *Carbon Management*. 2015. V. 6. P. 35–50. <https://doi.org/10.1080/17583004.2015.1071182>
42. *Martin J.G., Bolstad P.V.* Variation of soil respiration at three spatial scales: components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape // *Soil Biol. Biochem.* 2009. V. 41(3). P. 530–543. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.012>
43. *Martynenko I.A., Meshalkina J.L., Rappoport A.V., Shabarova T.V.* Spatial Heterogeneity of Some Soil Properties of the Botanical Garden of Lomonosov Moscow State University // *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services*. Springer International Publishing, Cham, P. 185–194. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89602-1_22)
44. *Ng B.J., Hutyra L.R., Nguyen H., Cobb A.R., Kai F.M., Harvey C., Gandois L.* Carbon fluxes from an urban tropical grassland // *Environ. Pollut.* 2014. V. 203. P. 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.009>
45. *Ossola A., Livesley S.J.* Drivers of soil heterogeneity in the urban landscape // *Urban Landscape Ecology: Science, Policy and Practice*. N.Y.: Routledge, 2015.
46. *Pickett S.T.A., Cadenasso M.L., Grove J.M., Boone C.G., Groffman P.M., Irwin E., Warren P.* Urban ecological systems: scientific foundations and a decade of progress // *J. Environ. Managem.* 2011. V. 92(3). P. 331–362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.022>
47. *Pouyat R.V., Groffman P.M., Yesilonis I., Hernandez L.* Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems // *Environ. Pollut.* 2002. V. 116. P. 107–118. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00263-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00263-9)
48. *Pouyat R.V., Yesilonis I.D., Nowak D.* Carbon storage in urban soils in the United States // *J. Environ. Qual.* 2006. V. 35. P. 1566–1575. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0215>
49. *Satterthwaite D.* Cities contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions // *Environ. Urbaniz.* 2008. V. 20 (2). P. 539–549. <https://doi.org/10.1177/0956247808096127>
50. *Schleuß U., Wu Q., Blume H-P.* Variability of soils in urban and periurban areas in Northern Germany // *Catena*. 1998. V. 33 (3-4). P. 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00070-8)
51. *Subke J., Heinemeyer A., Reichstein M.* Experimental design: Scaling up in time and space, and its statistical considerations // *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology*. P. 34–48. Cambridge: Cambridge University Press. 2010. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511711794.004>
52. United Nations. DESA/Population division. Revision of World Urbanization Prospects. N.Y.: United Nations, 2018.
53. *Vasenev V., Kuzyakov Y.* Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // *Land Degradation and Development*. 2018. V. 29. P. 1607–1622.
54. *Zhao Y.-G., Zhang G.-L., Zepp H., Yang J.-L.* Establishing a spatial grouping base for surface soil properties along urban–rural gradient—a case study in Nanjing, China. *Catena*. 2007. V. 69. P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.017>

## Biological Activity of Urban Soils: Spatial Variability and Determinal Factors

O. Yu. Goncharova<sup>1, \*</sup>, O. V. Semenyuk<sup>1</sup>, G. V. Matyshak<sup>1</sup>, and L. G. Bogatyrev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: goncholgaj@gmail.com*

An assessment of the value and spatial variability of the properties and parameters of the biological activity of anthropogenic soils on the territory of the Lomonosov Moscow State University, as well as the factors determining it, has been carried out. The properties of the upper horizon of the studied soils are expected to differ from the properties of natural zonal soils in the direction of an increase in pH (6.1–7.2), a significant increase of total carbon (0.9–10.6%) and its reserves in the upper 10 cm. layer (0.7–7.2 kg m<sup>-2</sup>). Most of the objects were characterized by increased values of microbial respiration (up to 8 mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) compared to zonal soils with comparable values of emission from the surface (230–750 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). A high variation of such soil properties as moisture, CO<sub>2</sub> emission, total carbon content, microbial respiration, cellulolytic activity, which is formed under the influence of the sum of anthropogenic and natural factors. Variability increases in the series: emission – microbial respiration – cellulolytic activity. The high variability of soil properties makes it difficult to determine the criteria for allocating sampling areas. The closest correlations with environmental factors were revealed for microbial respiration, according to the data obtained, the main predictors of this value are the carbon content and moisture, and the relationship with moisture is higher ( $r = 0.87$ ,  $p = 0.0002$ ). The significant enrichment of soils with carbon determines the potential for an increase in the CO<sub>2</sub> flux if changing the parameters of soil functioning. Difficulties in the interpretation of the results arise due to the “unaccounted” anthropogenic factors of variability, which are not included to the common set for such studies.

*Keywords:* anthropogenic soils, hydrothermal regime, microbial respiration, factor analysis, CO<sub>2</sub> emission, Phaeozem Organotransportic, Technic, Urbic Technosol